

文章编号: 0258-7106(2014)04-0807-14

陕西池沟斑岩型铜矿床含矿岩体地球化学特征、 成岩成矿时代及其意义*

任涛¹, 王瑞廷², 谢桂青³, 李剑斌¹, 代军治², 郭延辉¹, 党勘峰¹, 武晓琴¹

(1 西北有色地质勘探局七一三总队, 陕西 商洛 726000; 2 西北有色地质勘探局地质勘查院, 陕西 西安 710054;
3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 池沟铜钼多金属矿床是近年来在秦岭造山带发现的一处斑岩型矿床。文章对该矿床的成矿岩体进行了岩相学、岩石地球化学分析,并测试了矿石中辉钼矿的 Re-Os 年龄。结果表明:金属硫化物呈星散浸染状、细脉浸染状分布于池沟石英闪长岩中;池沟中酸性岩体属于高钾钙碱性系列,具准铝质-过铝质性质,微量元素分析结果显示其为碰撞后花岗岩;辉钼矿的 Re-Os 年龄为 148 Ma。池沟区内岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 140~148 Ma,与矿石辉钼矿的 Re-Os 年龄一致,均形成于侏罗纪晚期。结合岩体产状、含矿性判别分析,认为池沟中酸性岩体的形成和矿化发生在侏罗纪—白垩纪挤压-伸展转变期,对应的地球动力学背景为华北板块与扬子板块碰撞造山后的陆内造山和伸展过程。

关键词 地质学;中酸性岩体;地球化学特征;同位素年代;成矿背景;山阳池沟

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Geochemistry and rock-forming and ore-forming epochs of Chigou Cu porphyry deposit in Shaanxi Province, and their implications

REN Tao¹, WANG RuiTing², XIE GuiQing³, LI JianBin¹, DAI JunZhi², GUO YanHui¹,
DANG KanFeng¹ and WU XiaoQin¹

(1 No. 713 Geological Party of Northwest Geological Exploration and Mining Bureau for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, Shaanxi, China; 2 Northwest Geological Exploration and Mining Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The Chigou copper-molybdenum polymetallic deposit is a porphyry deposit in the Qinling orogenic belt. The ores show disseminated and fine-grained disseminated structure in Chigou quartz diorite. Geochemical analyses show that the intermediate-acid intrusive body of Chigou belongs to high-K calc-alkaline series, with aluminum-peraluminous characteristics. Trace elements features show the similarity to post-collision type granite. The dating by LA-ICP-MS of zircons and Re-Os of molybdenite indicates that the intermediate-acid intrusive body of Chigou have ages from 140 to 148 Ma, whereas the age of molybdenite obtained by Re-Os method is 148Ma. The ages of the intrusive body and its mineralization are consistent with each other, suggesting that they were both produced in the late Jurassic period. Combining the mode of formation of the intrusive body with its ore-

* 本文得到“十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAB04B05)和公益性行业科研专项(201111007-3)项目联合资助

第一作者简介 任涛,男,1967生,教授级高工,主要从事金属矿产勘查及技术管理工作。Email: 713dky@163.com

** 通讯作者 王瑞廷,男,1969生,教授级高工。Email: wrtyf@163.com

收稿日期 2014-05-29; 改回日期 2014-07-04。张锦玲编辑。

bearing potential, the authors hold that the intrusive body was produced and mineralized in the period of extrusion-stretching transformation during Jurassic to Cretaceous time. In addition, its geodynamics setting corresponded to the process of intra-continent orogeny and extension during the collision between North China plate and Yangtze plate.

Key words: geology, intermediate-acid intrusion, geochemical analyses, isotopic geochronology, ore-forming background, Chigou in Shangyang County

池沟铜钼多金属矿床位于陕西省山阳县境内,是近年来在秦岭造山带发现的一处斑岩型矿床。区内广泛发育中酸性小岩体群,地表铜、铁、钼矿化普遍,现已成为研究秦岭造山带成矿作用的热点地区。前人对区域内的地质构造、地球化学及与成矿有关地质体和铜钼矿床(点)开展了不同程度的研究(许志琴等,1986;张本仁等,1989;杨志华,1991;王相等,1996;张国伟等,1996;张宏飞等,1997;卢欣祥等,2002;杨志华等,2002;王宗起等,2002;张银龙,2002;朱多录等,2004;张宗清等,2006;王瑞廷等,2008;闫臻等,2008),多家单位和学者先后采用 Rb-Sr 法、K-Ar 法和 U-Pb 法获得本区中酸性小岩体的成岩年龄在 94.6~230 Ma 之间(尚瑞钧等,1989;朱铭,1995),属印支—燕山期侵入岩。由于采用的测年技术方法不同,岩体测年数据差别较大,给本区岩浆活动与金属矿床成矿作用关系的厘定带来一定难度。本文基于实际勘查需要和综合研究工作,通过对该区的辉钼矿进行 Re-Os 同位素定年以及岩石地球化学研究,结合前期对池沟地区几个典型岩体进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年工作,旨在查明岩体侵位时代、成矿时代和地质背景,为探讨该区岩浆活动与成矿关系提供依据。

1 区域地质概况及矿化特征

池沟中酸性岩体群分布于南秦岭印支褶皱带中段,北秦岭岛弧之柞水-山阳弧前盆地,北邻商州-丹凤断裂,南以山阳-凤镇断裂为界。区域出露地层为中-上泥盆统一套碎屑岩-碳酸盐岩,属浅海-半深海沉积。区内断裂发育,主要有 NW 向、NE 向和 EW 向断裂,它们相互穿插,反映了本区构造运动的频繁性。区内岩体主要分为 3 期:新元古代、印支期和燕山期。印支期岩体出露面积较大,包括柞水闪长岩体((225±1) Ma)、曹坪二长花岗岩体((224±1) Ma)、沙河湾闪长岩体((212±1) Ma)(弓虎军等,2009)。燕山期岩体主要为中酸性小岩体,小岩体群

沿近 EW 向断裂呈串珠状产出,如双元沟、土地沟、池沟、袁家沟、小河口、下官坊等中酸性小斑岩体,岩体中均具有不同程度的铜、钼矿化,其中小河口岩体与围岩生成了小型矽卡岩铜矿床,其余岩体皆为矿点。人们最关注的是这些中酸性小岩体能否形成斑岩型铜矿,因此有多家地勘单位对它们进行了长达 40 年的探索。近期,西北有色地质勘查局七一三总队在池沟石英闪长岩岩枝中发现了平均厚 96.92 m、平均品位 0.15% 的低品位铜矿体,初步确认其为斑岩型铜矿床。

池沟地区位于山阳-凤镇断裂北侧约 3.5 km,出露地层主要为中泥盆统的池沟组(D_2ch)和牛耳川组(D_2n),为一套浅变质的碎屑岩和碳酸盐岩,岩性有石英砂岩、粉砂质板岩、杂砂岩。区内构造整体呈单斜构造特征,断裂以近东西向的 F1、F2 两条断裂为主,其次为 NNE 向和 NW 向断裂。池沟岩体(群)共有 7 个小岩体,地表出露规模均较小,最大的 I 号二长花岗岩岩体面积仅为 0.06 km²,其余介于 0.001~0.02 km²。I 号二长花岗岩岩体属酸性深成相,呈不规则椭圆状,长轴为东西向,推测为小岩株,以钼矿化为主;II~VII 号岩体为石英闪长岩和石英闪长玢岩岩体,属中酸性浅成-超浅成相,呈不规则的圆形、椭圆状,长轴近南北向,呈岩株或岩枝产出(图 1,表 1),以铜矿化为主。岩体群受 NWW 向断裂与 NNE 向次级断裂的控制,被动侵位于中泥盆统池沟组浅变质的细碎屑岩中,从南向北表现出由酸性到中酸性的演化趋势。

岩体与围岩侵入接触,蚀变较强,且具有明显的分带性,以岩体为中心向四周呈环带状分布,呈东西向,蚀变面积是岩体出露面积的数十倍。主要的蚀变类型有角岩化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化、硅化和高岭土化等。其中青磐岩化常与钾硅酸盐化相叠加,钾长石化常发育于岩体或细脉(石英、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿细脉)中,黑云母化则在脉体的两侧分布,绢英岩化发育在岩体和接触带附近。其中钾硅酸盐化和绢英岩化与成矿关系最为密切,矿化程

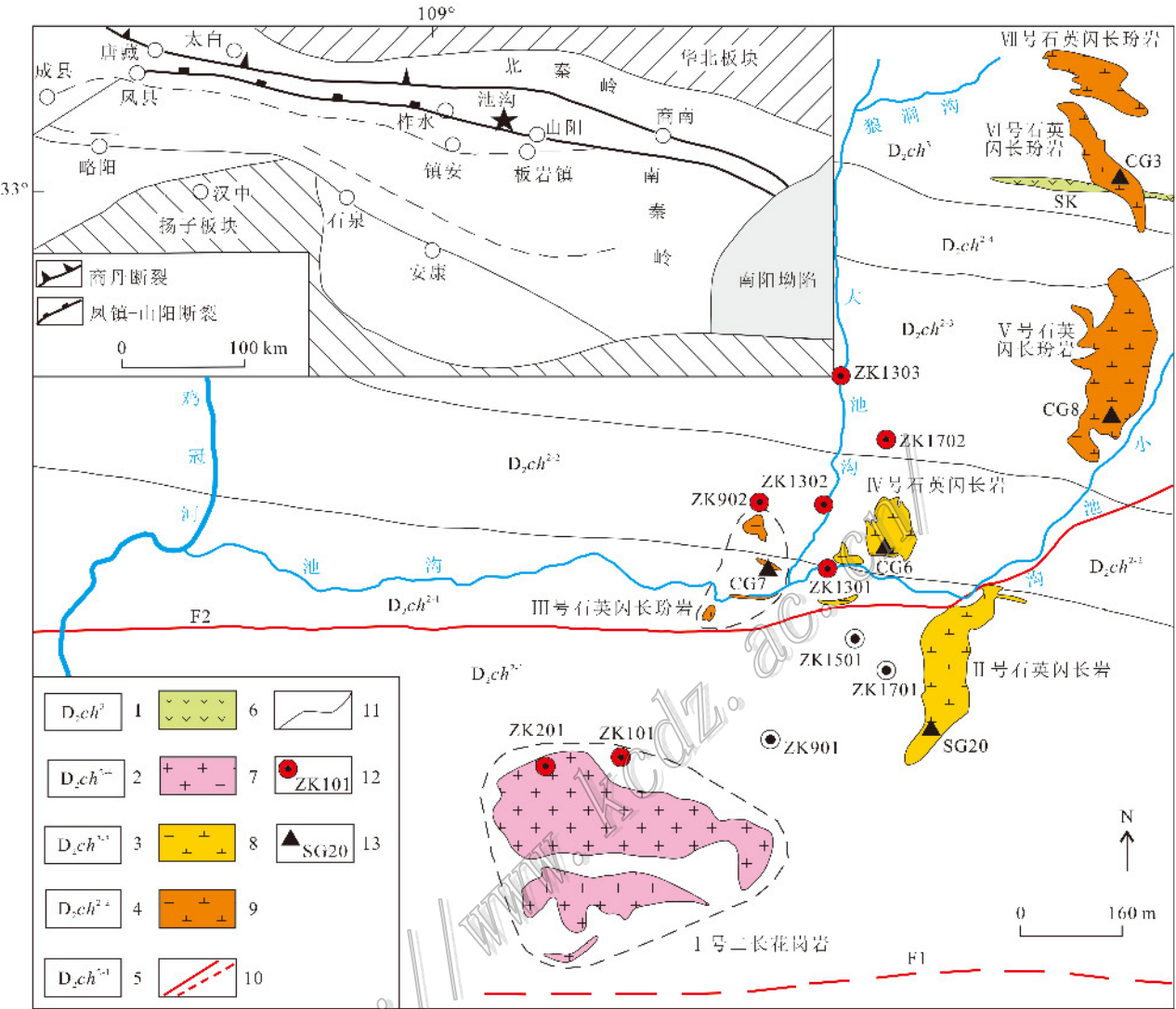


图 1 山阳县池沟地区地质简图

1—钙质砂质板岩与透辉石石英角岩；2—透辉石石英角岩；3—透辉石角岩夹黑云母角岩；4—黑云母角岩夹透辉石角岩；5—角岩化粉砂质板岩及黑云母角岩；6—砂卡岩；7—二长花岗岩岩体；8—石英闪长岩岩体；9—石英闪长玢岩岩体；10—实测和推测断裂；11—地层界线；12—钻孔位置及编号；13—采样位置及编号

Fig. 1 Simplified geological map of Chigou area in Shanyang County

1—Calc-sandy slate and diopside-quartz hornfels; 2—Diopside-quartz hornfels; 3—Diopside hornstone intercalated with biotite hornfels; 4—Biotite hornfels intercalated with diopside hornstone; 5—Hornfelsed siltstone and biotite hornfels; 6—Skarn; 7—Monzonitic granite; 8—Quartz diorite; 9—Quartz diorite porphyrite; 10—Measured and inferred fault; 11—Stratigraphic boundary; 12—Location and serial number of drill hole; 13—Sampling location and serial number

度随着蚀变强度的变强而增强。

区内矿体主要发育于岩体及岩体与围岩接触带附近,矿石矿物以黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿为主,其次为赤铁矿、磁黄铁矿等;脉石矿物有长石、石英、角闪石、黑云母、绢云母、绿泥石、绿帘石、方解石、金红石、硬石膏等。矿石构造类型主要有块状、星散浸染状、细脉浸染状、网脉状、脉状和晶洞状构造等,其中星散浸染状、细脉浸染状为该区的典型代表,在岩体

中尤为明显。

2 岩相学、矿相学特征

2.1 岩相学特征

池沟中酸性岩体岩石类型有 2 类,即二长花岗岩和石英闪长(玢)岩,规模、形态及主要矿物含量如表 1。

表 1 池沟地区不同岩体形态及主要造岩矿物含量

Table 1 Shape and main rock-forming minerals content of the intrusive rocks in Chigou area

岩体编号	岩石类型	规模			平面形态	产状	主要造岩矿物含量/%				
		长/m	宽/m	面积/km ²			斜长石	钾长石	石英	黑云母	角闪石
I	二长花岗岩	80~434	10~160	0.06	近椭圆形	岩株	30	35	20	10	1
II	石英闪长岩	278	22~76	0.02	近椭圆形	岩枝	55	14	7	3	18
III	石英闪长玢岩	32~70	2~40	0.001	枝状	岩脉	56	20	6	5	10
IV	石英闪长岩	32~90	26~76	0.006	近圆形	岩滴	57	10	9	4	18
V	石英闪长玢岩	450	20~124	0.02	近椭圆形	岩枝	60	13	10	3	12
VI	石英闪长玢岩	124	10~48	0.008	近圆形	岩枝	60	12	7	1	18
VII	石英闪长玢岩	184	24~62	0.007	近圆形	岩枝	58	14	8	1	17

二长花岗岩：呈浅灰-浅肉红色，似斑状结构，块状构造。主要造岩矿物为斜长石(约 30%)、钾长石(约 35%)、石英(约 20%)、黑云母(约 10%)和角闪石(约 1%)。斜长石具聚片双晶，环带发育；钾长石具卡式双晶，可见环带，交代斜长石，或形成格子状结构(图 2a)。黑云母呈片状或具角闪石假晶，或见角闪

石残留晶体。

石英闪长(玢)岩：呈灰白色，似斑状(图 2b、c)，不等粒结构、半自形粒状结构，块状构造。主要造岩矿物为斜长石(55%~60%)、钾长石(12%~20%)、石英(6%~10%)、角闪石(10%~18%)，次要矿物为黑云母(约 1%~5%)，副矿物有磁铁矿、榍石、磷

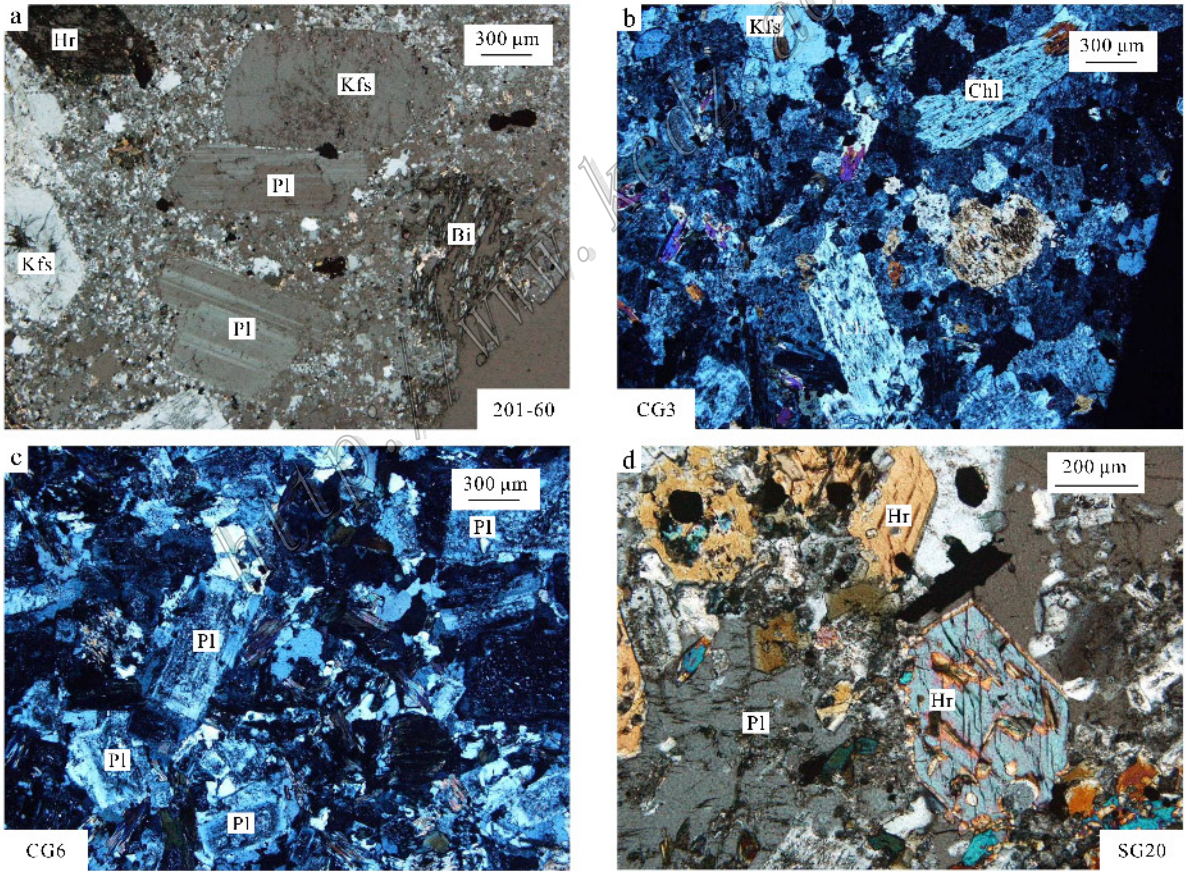


图 2 池沟地区不同岩体岩石镜下显微特征

a. I 号岩体二长花岗岩斑岩样品 201-60; b. VI 号闪长玢岩样品 CG3; c. IV 号似斑状石英闪长岩样品 CG6; d. II 号石英闪长岩样品 SG20
Hr—角闪石; Bi—黑云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Chl—绿泥石

Fig. 2 Microscopic features of the intrusive rocks in Chigou area

a. 201-60 is monzonitic granite porphyry of No. I rock body; b. CG3 is dioritic porphyrite of No. VI rock body; c. CG6 is porphyritic quartz diorite of No. IV rock body; d. SG20 is quartz diorite of No. II rock body
Hr—Amphibole; Bi—Biotite; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Chl—Chlorite

灰石、锆石、黄铁矿等。斑晶由斜长石、角闪石(图2d)、黑云母及石英组成,常有巨斑出现,含量约占70%,基质为细粒斜长石、钾长石和石英,呈显微花岗结构。岩体(株、枝)中钾长石一般有高岭石化,强弱不一。斜长石以更-中长石为主, $An = 26 \sim 37$,多集中于33,玢岩和石英闪长岩中的斜长石 An 较大,斜长石聚片双晶和卡钠复合双晶发育,普遍具环带构造,环带3~5个不等,酸性岩一般内环 An 为27~32,外环 An 为32~34,属反环带,表明岩浆酸性减弱。偏中性岩,斜长石具正环带。从长石的无序特征分析,具有浅成、超浅成岩的特点。

岩体石英斑晶中的石英多为六方双锥状、短柱状,常遭溶蚀而呈浑圆状、港湾状。黑云母一般颗粒较小,含量较低,但晶形较完整。不同岩体黑云母的化学成分相似。人工重砂分析结果显示副矿物以磁铁矿为主,其次是榍石、磷灰石、锆石、黄铁矿等。副矿物组合一致,说明本区小岩体在成因上密切相关。

2.2 矿相学特征

利用光学显微镜对矿石进行观察,表明池沟矿区的矿石主要发育黄铜矿化和辉钼矿化,显示铜矿和钼矿密切共生(图3a),暗示区内铜、钼成矿具有同期性。池沟矿区铜矿化主要可以分为3期(图3b、c): ① 热液早期钾化-硅化-硫化物阶段,细脉产出,在该区较为发育,主要矿物组合为钾长石+石英+黄铁矿±黄铜矿±辉钼矿±绿泥石,以钾长石化为典型特征,形成脉较细,黄铜矿断续产出,部分地段可见共轭脉产出,钼矿化主要形成于此阶段; ② 热液中期硅化-绿泥石化-硫化物阶段,脉状,为最主要的矿化阶段,矿物组合较为复杂,主要矿物为石英+绿泥石+黑云母+黄铜矿±钾长石,脉体较宽,部分

可见它们穿插①期细脉,铜成矿作用与绿泥石化和绿帘石化叠加钾化和黑云母化密切相关; ③ 最晚期沸石-硫化物-碳酸盐阶段,沿中轴发育穿插岩体与角岩接触带或沿角岩和岩体接触面呈团块状或者呈网脉状产于角岩中,矿物组合为沸石+方解石±黄铁矿±黄铜矿±辉钼矿,可见其穿切①期细脉和②期脉,沸石脉穿切岩体中角闪石和斜长石斑晶。以上3个阶段的成矿特征与中国典型斑岩铜矿床非常类似。

3 岩石地球化学特征

为了查明池沟岩体群的地球化学特征,本次工作在池沟及周边双元沟、土地沟、小河口岩体分别采集了石英闪长岩、斜长花岗斑岩、二长花岗岩、花岗斑岩共8件样品(采样位置见图1),进行了岩石地球化学分析。

3.1 主量元素特征

8件岩石样品的主量元素分析结果和特征值见表2。分析结果表明: $w(\text{SiO}_2)$ 为58.01%~67.78%,贫硅, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.22%~0.84%,富铝, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为14.26%~16.46%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为0.17%~4.18%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为2.92%~5.61%, $w(\text{CaO})$ 和 $w(\text{MgO})$ 较高,分别为2.07%~5.10%和0.67%~3.39%(表2)。

经过主要造岩矿物统计(表1)换算后,将岩石地球化学成分投到Q-A-P图中,结果显示池沟地区的岩石类型分为二长花岗岩、花岗闪长岩及石英二长闪长岩(图4)。

总体来说,池沟岩体的钾含量较高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$

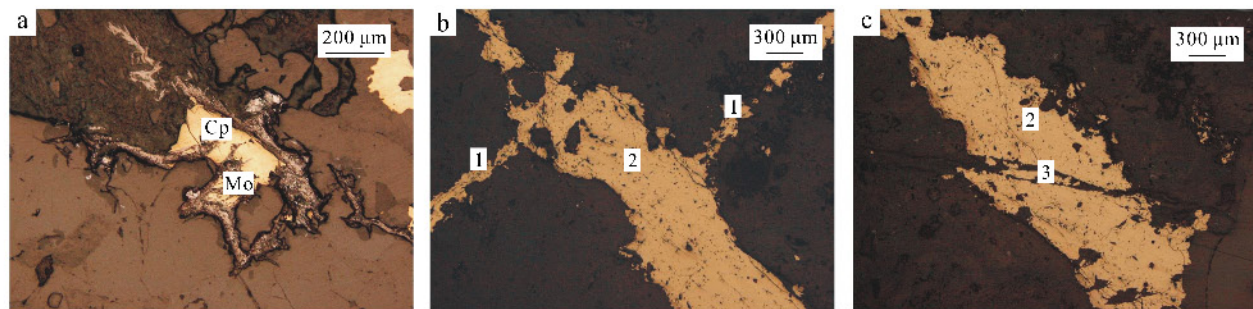


图3 池沟地区典型矿石镜下显微特征

a. 呈共生关系的黄铜矿与辉钼矿; b. 第①期和第②期铜矿化; c. 第②期和第③期铜矿化

Fig. 3 Microscopic features of typical ores of Chigou area

a. Association of chalcopyrite and molybdenite; b. First phase and second phase copper mineralization; c. Second phase and third phase copper mineralization

表 2 池沟地区不同岩体主量、稀土和微量元素分析结果

Table 2 Major elements, rare earth elements and trace elements analyses of the intrusive rocks in Chigou area

项目	双元沟	土地沟	池沟					小河口
			I	II	III	IV	V	
岩石名称	石英闪长岩	斜长花岗岩	二长花岗岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	花岗岩
样品编号	S7201-1	401-11	101-25	SG20	CG7	1302-9	CG8	XHK1
				w(B)/%				
SiO ₂	65.75	61.14	66.43	58.01	62.67	62.22	65.78	67.78
TiO ₂	0.40	0.46	0.40	0.84	0.67	0.57	0.50	0.22
Al ₂ O ₃	15.95	15.02	15.71	16.20	16.46	15.18	16.44	14.26
Fe ₂ O ₃	3.87	4.03	3.63	7.29	4.39	4.49	2.33	1.68
MnO	0.06	0.08	0.14	0.12	0.05	0.05	0.03	0.20
MgO	1.23	1.57	1.21	3.39	2.25	1.92	1.23	0.67
CaO	2.90	3.75	2.07	5.10	2.46	3.53	2.63	3.75
Na ₂ O	4.18	2.57	4.14	3.96	3.91	3.69	3.64	0.17
K ₂ O	3.06	4.06	3.84	2.92	3.46	3.48	5.11	5.61
P ₂ O ₅	0.24	0.23	0.25	0.50	0.45	0.37	0.33	0.13
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
StrO	0.10	0.03	0.13	0.14	0.15	0.13	0.14	0.03
BaO	0.16	0.11	0.41	0.33	0.39	0.33	0.40	0.12
LOI	1.87	6.74	1.50	1.14	1.73	3.84	1.24	4.49
总和	99.78	99.80	99.87	99.95	99.05	99.81	99.81	99.12
Na ₂ O+K ₂ O	7.24	6.63	7.98	6.88	7.37	7.17	8.75	5.78
K ₂ O/Na ₂ O*	0.73	1.58	0.93	0.74	0.88	0.94	1.40	33.00
R1	2071.46	2097.01	1954.77	1570.34	1849.07	1892.54	1822.44	3093.78
R2	684.18	773.75	589.68	1031.66	697.73	770.72	756.94	279.72
σ^*	2.30	2.42	2.72	3.15	2.76	2.67	3.36	1.35
A/CNK*	1.03	0.97	1.07	0.85	1.12	0.93	1.01	1.08
A/NK*	1.56	1.74	1.43	1.67	1.62	1.54	1.43	2.24
				w(B)/10 ⁻⁶				
La	26.30	44.30	50.30	41.00	42.80	39.60	44.00	22.10
Ce	51.00	84.70	85.80	79.90	82.40	74.80	85.90	43.90
Pr	6.29	9.45	9.36	9.59	9.87	8.62	9.94	5.28
Nd	23.50	33.10	32.20	35.80	37.00	31.90	35.40	19.10
Sm	4.08	5.41	5.07	6.34	6.31	5.49	5.67	3.31
Eu	1.07	1.29	1.23	1.65	1.75	1.35	1.51	0.81
Gd	3.49	4.66	4.34	5.45	5.72	4.67	4.77	2.83
Tb	0.47	0.59	0.50	0.70	0.74	0.58	0.58	0.35
Dy	2.54	3.15	2.48	3.81	3.94	3.03	2.89	1.90
Ho	0.45	0.61	0.45	0.69	0.74	0.55	0.51	0.34
Er	1.40	1.96	1.34	2.07	2.26	1.71	1.72	1.18
Tm	0.17	0.26	0.16	0.27	0.28	0.22	0.20	0.14
Yb	1.35	1.88	1.30	1.94	2.07	1.65	1.64	1.13
Lu	0.21	0.31	0.20	0.31	0.32	0.26	0.25	0.18
Ba	1525.0	1040.0	3770.0	2890.0	3490.0	3130.0	3490.0	1210.0
Co	7.40	2.60	5.70	16.20	9.10	9.80	22.50	1.50
Cr	10.00	<10	20.00	40.00	10.00	20.00	10.00	<10
Ca	4.05	4.24	1.52	2.83	2.84	3.08	4.43	2.89
Ga	18.80	17.60	20.50	20.00	20.40	19.50	19.70	17.10
Hf	4.00	5.10	5.40	5.20	6.20	5.90	5.80	3.40
Nb	7.70	8.50	15.60	14.30	15.30	15.70	16.80	8.80
Pb	30.00	<5	13.00	12.00	13.00	11.00	14.00	336.00
Rb	82.60	147.00	81.50	75.70	106.50	119.00	152.00	187.00
Sn	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	3.00	1.00
Sr	834.00	175.00	1155.00	1230.00	1260.00	1190.00	1115.00	215.00

续表 2
Cont. Table 2

项目	双元沟	土地沟	池沟					小河口
			I	II	III	IV	V	
岩石名称	石英闪长岩	斜长花岗斑岩	二长花岗岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	花岗斑岩
样品编号	S7201-1	401-11	101-25	SG20	CG7	1302-9	CG8	XHK1
Ta	0.50	0.50	1.10	0.90	1.00	1.10	1.10	0.70
Th	5.12	7.64	21.00	12.05	15.40	17.30	21.00	6.47
Tl	<0.5	0.60	<0.5	0.50	0.50	0.50	0.80	0.70
U	1.53	1.49	4.09	1.86	3.48	4.60	4.20	2.44
V	51.00	56.00	58.00	139.00	101.00	82.00	69.00	31.00
W	1.00	2.00	3.00	2.00	3.00	3.00	2.00	5.00
Y	13.70	17.70	13.00	19.70	21.10	16.00	15.50	11.30
Zn	45.00	29.00	24.00	57.00	44.00	32.00	20.00	272.00
Zr	146.00	184.00	192.00	188.00	225.00	213.00	206.00	110.00
ΣREE	122.32	191.67	194.73	189.52	196.20	174.43	194.98	102.55
LREE	112.24	178.25	183.96	174.28	180.13	161.76	182.42	94.50
HREE	10.08	13.42	10.77	15.24	16.07	12.67	12.56	8.05
LREE/HREE*	11.13	13.28	17.08	11.44	11.21	12.77	14.52	11.74
(La/Yb) _N	12.99	15.71	25.79	14.09	13.78	16.00	17.89	13.04
δEu*	0.85	0.77	0.78	0.84	0.88	0.80	0.87	0.79
δCe*	0.87	0.90	0.84	0.88	0.87	0.88	0.89	0.89

注：主量元素和微量元素分析仪器分别为澳实分析检测(广州)有限公司 ME-XRF06X 荧光光谱分析仪和 ME-MS81 等离子体质谱仪。*单位为 1。

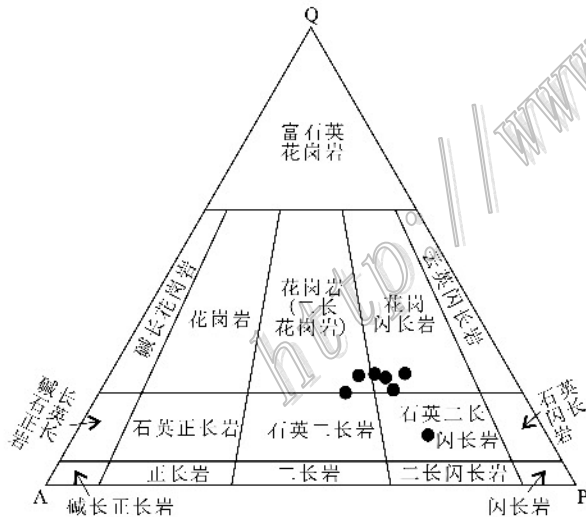


图 4 池沟地区不同岩体的 Q-A-P 图解
Fig. 4 Q-A-P discrimination plots for the intrusive rocks in Chigou area

比值为 0.73~33.00, 平均 5.03; 里特曼指数 σ 介于 1.3~3.3 之间, 小于 4, 反映其为钙碱性岩石系列, 与相关判别图解结论相符(图 5a); 铝指数 A/CNK 介于 0.85~1.12 之间, 在 A/NK-A/CNK 相关图(图 5b)中为准铝质-过铝质花岗岩。

3.2 微量、稀土元素特征

8 件岩石样品的微量元素、稀土元素分析结果见表 2。稀土元素总量 ΣREE 为 $102.55 \times 10^{-6} \sim 196.2 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.13 \sim 17.08$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 12.99 \sim 25.79$, $\delta \text{Eu} = 0.77 \sim 0.88$, $\delta \text{Ce} = 0.84 \sim 0.90$ 。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式上呈现出轻重稀土元素强烈分馏、轻稀土元素富集的特点, 具有弱的铈、铈负异常(图 6a)。微量元素具有 K、Rb、Th、Ba 富集, Ta、Nb、Ce 基本持平, Zr、Hf、Sm、Y、Yb 亏损的特点(图 6b)。整体上稀土元素配分模式与 Pearce 等(1984)阐述的火山弧型花岗岩的类似, 具碰撞后花岗岩的特征。

4 同位素地质学特征

4.1 岩体的锆石 U-Pb 年龄

利用 LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术(侯可军等, 2009), 谢桂青等(2012)在池沟地区获得了石英闪长岩的 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄, 分别为 $(145 \pm 1) \text{ Ma}$ ($n = 8$, $\text{MSWD} = 1.0$) 和 $(146 \pm 1) \text{ Ma}$ ($n = 19$, $\text{MSWD} = 0.3$), 代表了池沟岩体的侵位年龄(谢桂青等, 2012)。池沟岩体与区

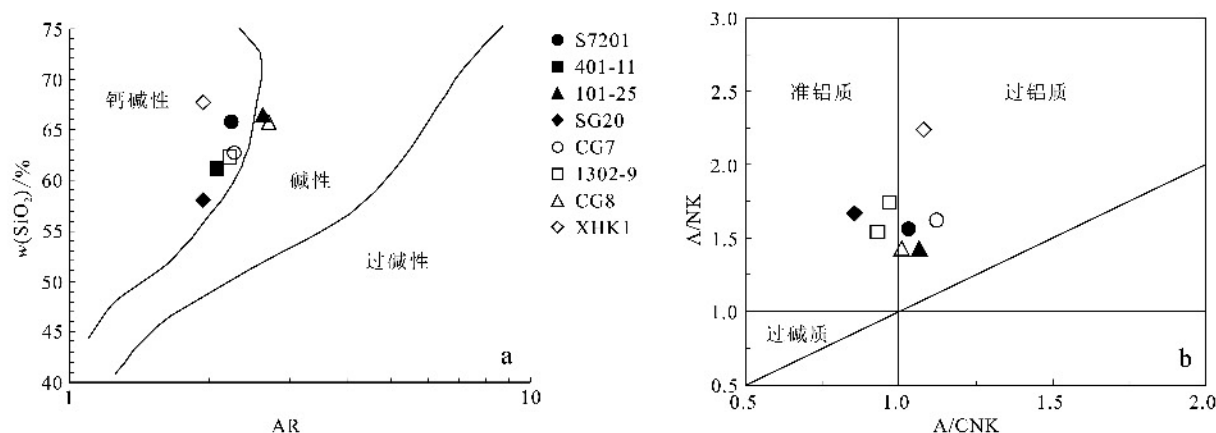


图5 池沟地区不同岩体的 SiO_2 -AR 图解(a)及 A/NK-A/CNK 图解(b)

$$\text{AR} = \frac{w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})}{w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) - w(\text{Na}_2\text{O}) - w(\text{K}_2\text{O})}$$

Fig. 5 Diagrams of SiO_2 -AR (a) and A/NK-A/CNK (b) of the intrusive rocks in Chigou area

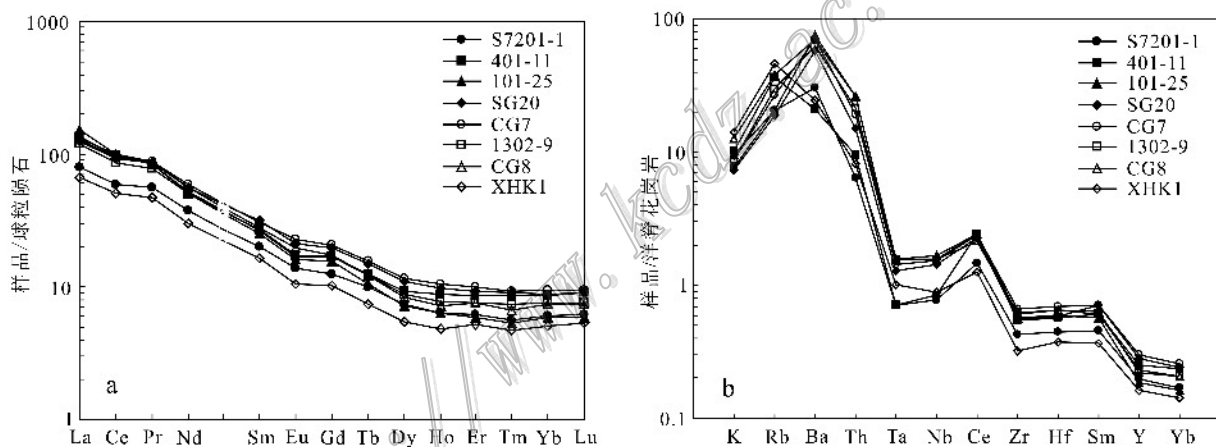


图6 池沟地区不同岩体的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)及微量元素洋脊花岗岩标准化蛛网图(b)

(球粒陨石据 Sun et al., 1989; 洋脊花岗岩据 Pearce et al., 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive ORG-normalized trace element patterns (b) for the intrusive rocks in Chigou area (chondrite and ORG data after Sun et al., 1989; Pearce et al., 1984)

内小河口、袁家沟等岩体侵位年龄基本一致,因此,认为池沟地区岩体形成于晚侏罗世—早白垩世,为燕山期秦岭造山带构造-岩浆作用的产物。

4.2 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄

池沟铜钼矿床中的辉钼矿主要与石英、钾长石呈脉状产于岩体或角岩中,与钾化和黑云母化密切相关,显微特征显示黄铜矿与辉钼矿同时形成(图3)。为了测定池沟铜钼矿床的成矿年龄,笔者挑选了5件微细浸染状钼矿石的辉钼矿样品开展了 Re-Os 同位素测年。其中样品 1302-38、1302-40、1302-41 分别采自池沟 ZK1302 钻孔 38 m、40 m、41 m 处

岩芯,样品 101-6 采自池沟 ZK101 钻孔 6 m 处岩芯,样品 201-20 采自池沟 ZK201 钻孔 20 m 处岩芯(钻孔位置见图1)。辉钼矿 Re-Os 同位素测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法及程序详见 Shirey 等(1995)文献。

5件辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果(表3)表明,池沟铜钼矿床的辉钼矿 $w(^{187}\text{Re})$ 较低,变化范围为 $(48.71 \pm 0.43) \times 10^{-6} \sim (179.9 \pm 1.4) \times 10^{-6}$ 。辉钼矿的 Re-Os 模式年龄变化较窄,为 $(147.1 \pm 2.2) \sim (148.3 \pm 2.1)$ Ma。与石英、钾长石、黄铜矿和黄铁矿共生的辉钼矿,分析2次辉钼矿 Re-Os 模式年龄,

表 3 池沟辉钼矿的 Re-Os 同位素分析测试结果

Table 3 Analytical data of Re-Os isotopes for molybdenites in Chigou area

样品号	<i>m</i> /g	<i>w</i> (Re)/μg/g	<i>w</i> (普 Os)/ng/g	<i>w</i> (¹⁸⁷ Re)/μg/g	<i>w</i> (¹⁸⁷ Os)/ng/g	模式年龄/Ma
1302-38	0.00555	152.3±1.2	0.0644±0.3610	95.70±0.74	236.2±2.0	147.9±2.1
1302-40	0.00533	77.50±0.68	0.0672±0.2259	48.71±0.43	119.9±1.2	147.6±2.3
1302-41	0.00548	77.63±0.60	0.0652±0.2192	48.79±0.38	119.8±1.1	147.1±2.2
101-6	0.00508	221.0±1.7	0.0660±0.3698	138.9±1.1	343.7±2.8	148.3±2.1
201-20	0.00583	286.2±2.3	0.4819±0.1400	179.9±1.4	444.2±3.6	148.0±2.1
JDC 测试 1	0.10033	17.11±0.13	—	—	25.0±0.2	139.4±2.0
JDC 测试 2	0.10045	17.04±0.13	—	—	24.7±0.2	138.2±2.0
JDC 标准	—	17.39±0.32	—	—	25.46±0.60	139.6±3.8

注：Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差，置信水平 95%；模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%)，置信水平 95%； $\lambda(^{187}\text{Os 衰变常数})=1.666\times 10^{-11}/\text{a}$ (Smoliar et al., 1996)，Re-Os 模式年龄按下列公式计算： $t=[\ln(1+^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]/\lambda$ 。

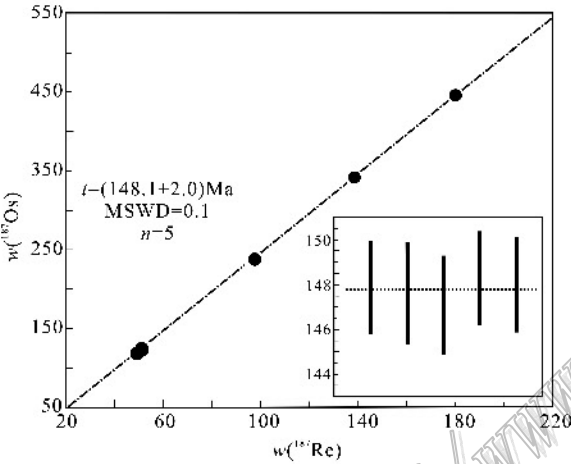


图 7 池沟地区辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线图

Fig. 7 Re-Os isochron plot of molybdenites in Chigou area

结果分别为(147.6±2.3) Ma 和(147.1±2.2) Ma，两者在误差范围内完全一致。采用 ISOPLOT 软件对获得的 5 件样品数据进行等时线处理，所得 Re-Os 同位素等时线年龄为(148.1±2.0) Ma，MSWD = 0.1(图 7)。

5 讨论

5.1 岩体侵位时代

对池沟地区中酸性岩体的锆石 LA-MC-ICP-MS 测年结果表明，这些岩体年龄变化范围为 140~148 Ma，主要集中于 144~145 Ma，指示其形成于晚侏罗世，而非前人所认为的印支-燕山期(尚瑞钧等，1989)。

实际上，池沟地区中酸性岩体的年龄不但与凤

镇-山阳断裂南侧冷水沟花岗闪长岩和花岗斑岩年龄相同，而且与金堆城花岗岩体年龄(140.95±0.45) Ma，朱赖民等，2008)近于一致。均形成于秦岭陆内造山中后期，指示这些中酸性小岩体可能形成于同一构造背景。

5.2 成矿时代

矿石的精确测年是建立矿床模型和反演成矿地球动力学背景的重要基础资料。卢欣祥等(2002)系统研究了东秦岭花岗岩成矿作用和成矿类型，提出成矿时代主要集中于 140~120 Ma。池沟地区成矿时代最初主要是通过通过与成矿有关岩体的 K-Ar 法和 Rb-Sr 等时线法间接获得，如获得双元沟等岩体年龄为 94.6~172 Ma、小河口花岗闪长岩的全岩和黑云母年龄为 230 Ma，范围太宽，难以精确厘定成矿时代。大多数情况下硅酸盐蚀变矿物的 K-Ar 法年龄不能反映硫化物矿化的时间(Selby et al., 2001)，相比之下，辉钼矿的 Re-Os 测年要精确一些。辉钼矿 Re-Os 同位素体系的封闭温度较高(约 700℃)，不易受到后期热液、变质和构造事件的影响，因此，辉钼矿 Re-Os 年龄能够精确地代表硫化物的形成时代。本次研究的辉钼矿颗粒较细(粒度约 0.1 mm)，对与石英、钾长石和硫化物共生的辉钼矿样品(1302)进行了 2 次重复测试，模式年龄分别为(147.6±2.3) Ma 和(147.1±2.2) Ma(表 3)，在误差范围内完全一致。本次测试获得的等时线年龄为(148.1±2.0) Ma(图 7)，未受到失耦作用的影响，代表了池沟矿床的成矿时代。

5.3 成岩与成矿的关系

池沟地区中酸性岩体的锆石 U-Pb 同位素年龄 140~148 Ma 与辉钼矿 Re-Os 模式年龄(148±2)

M_a ,在误差范围内基本一致,表明成矿与成岩作用近于同时或略滞后于岩体形成。其成矿物质来源于岩体本身(任涛等,2009),铜、钼、铁矿化均与侵入岩系统有关,成岩成矿为同一构造岩浆事件的产物,是同一成矿系统的作用(翟裕生,1996)。

岩石地球化学分析结果显示,池沟地区中酸性岩体的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 58.01%~67.78%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.73~33.00, 稀土元素总量为 $102.55 \times 10^{-6} \sim 196.2 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.13 \sim 17.08$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 12.99 \sim 25.79$, $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.88$, 与卢欣样等(2002)总结的东秦岭深源浅成花岗岩 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围宽(65%~76%)、多数样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值大于 1、稀土元素总量平均为 185.85×10^{-6} 、轻稀土元素富集、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均为 24.27、销弱亏损、 δEu 平均 0.74 的特点基本一致。稀土元素配分曲线型式也基本相同,说明成岩成矿可能来自同一系统,有相似的成因和来源。

利用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}-\text{SiO}_2$ 图解(图 8b)对岩体的含矿性判别,结果双元沟岩体、池沟I号和III号岩体、小河口岩体落入含矿岩体区,这已被目前勘查所证实。利用 $\text{Rb}-\text{Ba}-\text{Sr}$ (图 8a)图解判别,土地沟和小河口岩体落入异常花岗岩区,其余落入石英闪长岩区,说明土地沟岩体是成矿有利岩体,揭示出池沟岩体与土地沟岩体和小河口岩体有一定的差异。

5.4 成矿物质和岩浆来源

池沟地区花岗岩具有深源特征,毛景文等(Mao

et al., 1999)通过对比中国部分辉钼矿的 Re 含量后得出,从幔源、壳幔混源到壳源,其辉钼矿中的 $w(\text{Re})$ 变化规律为 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$, 即呈数量级下降,池沟地区辉钼矿 $w(\text{Re})$ 范围为 $77.5 \times 10^{-6} \sim 286.2 \times 10^{-6}$ (表 3), 平均 162.9×10^{-6} , 说明成岩成矿物质的主要来源与壳幔混源有关。小河口花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值平均为 0.705 73(张银龙,2002), 接近上地幔 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.702~0.706), 表明其物质来源于上地幔。东秦岭斑岩型矿床岩石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般为 $-1.4\text{‰} \sim +2.67\text{‰}$, 氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值多小于 10‰ , 铅同位素 μ 值平均 8.06, 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值接近 -5‰ (徐兆文等,1995;1998;卢欣样等,2002), 结合国内外的相关研究(Collins et al., 1982; Bonin, 2004; 芮宗瑶等, 2004; 张洪涛等,2004; Sillitoe, 2010), 认为此类花岗岩来源于上地幔—下地壳。

岩石的主、微量元素特征也反映出岩体的深源特点,在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (图 9a)图解中大部分落于 I 型花岗岩区,个别样品落于 A 型和 S 型花岗岩区;角闪石原子数 $\text{Ca}-(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})-\text{Mg}$ (表 4, 图 9b)图解落入壳幔型;在 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ (图 9c)图解中大部分落于基性岩和变质砂岩部分熔融区,均反映了成岩物质以壳幔混源为特点。

因此,可以认为源于富集地幔的岩浆在上升过程中经历了分离结晶和地壳混染,形成了本区中酸性岩体,幔源岩浆分异的深部流体参与了成矿作用。

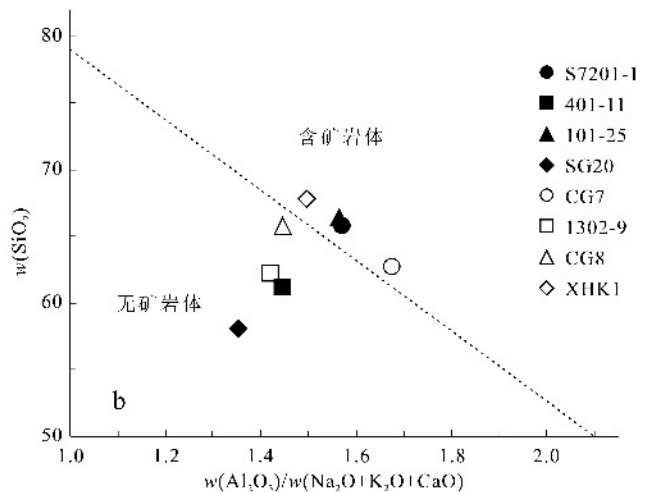
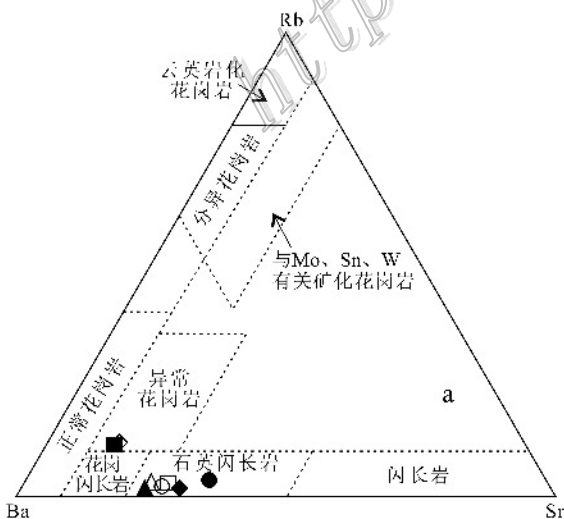


图 8 池沟地区不同岩体的 $\text{Rb}-\text{Ba}-\text{Sr}$ (a)和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ vs SiO_2 (b)图解

Fig. 8 $\text{Rb}-\text{Ba}-\text{Sr}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ vs SiO_2 discrimination diagrams for the intrusive rocks in Chigou area

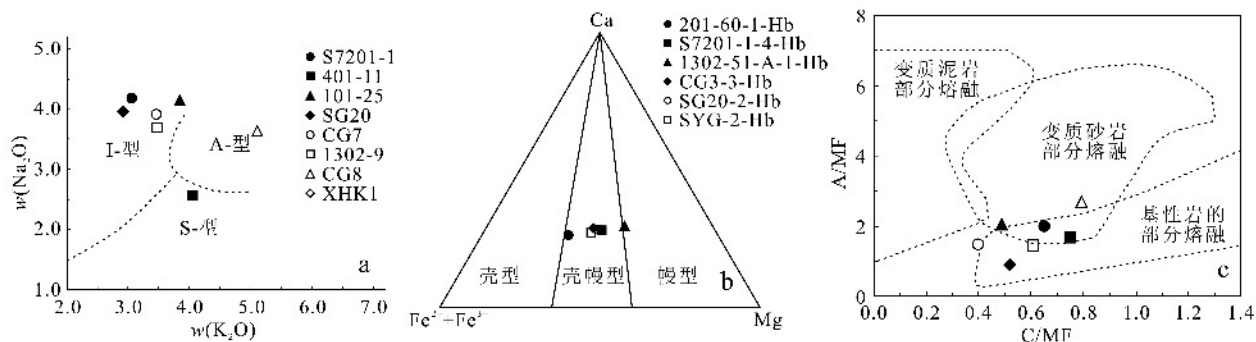


图 9 池沟地区不同岩体的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 关系 (a)、角闪石 $\text{Ca}-(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})-\text{Mg}$ (b) 和 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ (c, 图例同 a) 图解
(底图据 Collins et al., 1982; Altherr et al., 2000)

$\text{A} = n(\text{Al}_2\text{O}_3)$; $\text{M} = n(\text{MgO})$; $\text{F} = n(\text{TFeO})$; $\text{C} = n(\text{CaO})$; $\text{A}/\text{MF} = n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{TFeO}) + n(\text{MgO})$; $\text{C}/\text{MF} = n(\text{CaO})/n(\text{TFeO}) + n(\text{MgO})$

Fig. 9 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (a), hornblende $\text{Ca}-(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})-\text{Mg}$ (b) and $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ (c) discrimination diagrams for the intrusive rocks in Chigou area (base map after Collins et al., 1982; Altherr et al., 2000)

表 4 池沟地区部分岩体中角闪石电子探针微区元素分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of hornblendes from the main intrusive rocks in Chigou area

岩体编号	样品号	w(B)/%										
		SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	TiO_2	MnO	总和
池沟 I	201-60-1-Hb	44.44	8.30	16.63	10.11	12.50	2.42	1.00		1.28	0.68	97.36
池沟 II	SG20-2-Hb	49.45	5.03	12.78	10.92	16.14	1.30	0.54		1.27	0.60	98.03
池沟 IV	1302-51-A-1-Hb	45.66	9.54	8.79	10.24	17.64	2.82	0.96	0.06	1.85	0.17	97.73
池沟 VI	CG3-3-Hb	54.08	1.32	13.51	11.46	15.65	0.45	0.18		0.55	0.89	98.09
双元沟	SYG1-2-Hb	49.48	5.63	13.57	10.39	15.17	1.38	0.39		0.56	0.64	97.21
双元沟	S7201-1-4-Hb	48.95	5.47	12.18	10.40	16.34	1.23	0.56	0.08	0.84	1.23	97.28

注：201-60-1-Hb 号样品为二长花岗岩，其余均为石英闪长岩；中国地质大学(北京)地质实验中心 EPMA-1600 型电子探针仪定量分析。

5.5 构造环境分析

Rb-Y + Nb 和 Rb/30-Hf-3Ta 构造判别图解(图 10a、b)显示,样品落于火山弧花岗岩区域,而在 R1-R2 判别图中样品多落于碰撞后花岗岩区域中(图 10c),显示区内岩体成因复杂。近年来,部分学者的研究成果显示柞水-山阳地区基底耀岭河群既存在岛弧性质的火山岩(凌文黎等, 2002; 彭海练等, 2004),又存在陆内裂谷性质的火山岩(牛宝贵等, 2006; 杨钊等, 2008)。在 A/MF-C/MF 图解中(图 9c),部分样品落入基性岩的部分熔融范围内,结合图 10 可以判断区内岩体在其成岩过程中混染了基底岛弧性质的火山岩,这样就造就了这些小岩体形成于碰撞造山后环境,却具有某些典型火山弧构造环境的特征。

池沟地区中酸性岩体与华北板块南缘的金堆城、白石坡花岗斑岩、雷门沟花岗斑岩、华山岩体、娘娘山岩体、文峪岩体具有相近的同位素年龄,地球化

学特征近乎一致(李永峰等, 2006; 王义天等, 2010; 王瑞廷等, 2014),又与中国东部构造体制大转换晚期的伸展地球动力学事件发生于 140 Ma 左右(毛景文等, 2005)相吻合。岩体的形成和铜、钼矿化均发生于侏罗纪—白垩纪挤压-伸展转变期,对应的地球动力学背景为华北板块与扬子板块碰撞造山的后陆内造山和伸展过程(Meng et al., 2000; 张国伟等, 1996),即南北主应力场向东西主应力场构造体制大转折和东西向岩石圈大规模减薄作用所伴随的壳幔强烈作用阶段。由于岩石圈不同程度减薄,发生的岩石圈拆沉作用,引发软流圈的上隆抬升,东秦岭受板片断离作用和壳幔边界附近发生的基性岩浆底侵作用影响,加厚的下地壳物质发生熔融形成富 Cu 元素的花岗质岩浆,并沿构造薄弱带上升到浅部侵位,岩浆冷凝分异出的成矿流体充填和交代围岩,形成了与同熔型花岗斑岩有关的斑岩体和斑岩型矿床。

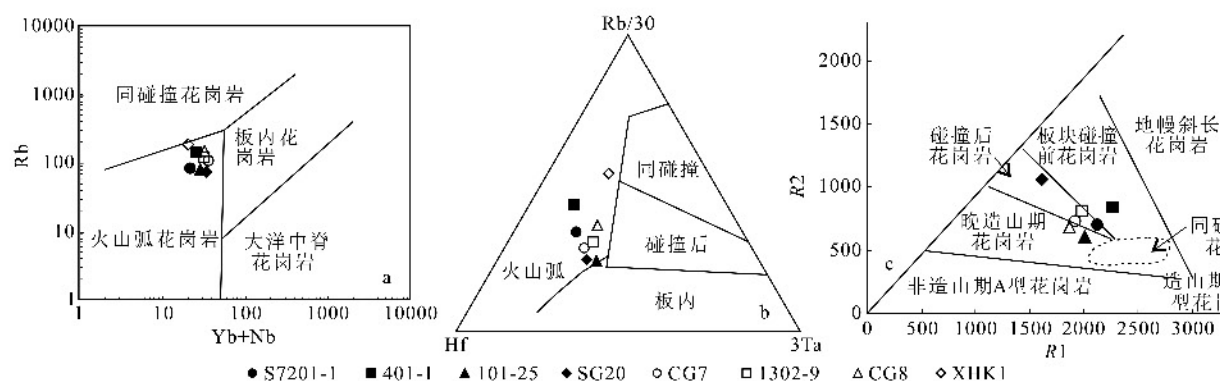


图 10 池沟地区不同岩体的 Rb-Y+Nb(a)和 Rb/30-Hf-3Ta(b)及 R1-R2(c)图解(底图据 Pearce, 1996; Harris et al., 1986; Batchlor et al., 1985)

$$R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti), R2 = 6Ca + 2Mg + Al$$

Fig. 10 Rb-Y+Nb (a), Rb/30-Hf-3Ta (b) and R1-R2 (c) discrimination diagrams for the main intrusive rocks in Chigou area (base map after Pearce, 1996; Harris et al., 1986; Batchlor et al., 1985)

6 结论

(1) 池沟地区中酸性岩体的岩石类型主要为二长花岗岩和花岗闪长岩,属高钾钙碱性系列,为准铝质-过铝质型。

(2) 池沟地区岩体岩石元素地球化学研究结果表明,稀土元素总量小于 200×10^{-6} ,稀土元素配分曲线右倾平滑,富集轻稀土元素,铈呈弱异常,微量元素具有 K、Rb、Th、Ba 富集, Zr、Hf、Sm、Y、Yb 亏损的特点,显示其具有壳幔混合源的特征。

(3) 锆石测年结果表明,池沟地区中酸性岩体的锆石 U-Pb 同位素年龄为 140~148 Ma, 辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (148.1 ± 2.0) Ma, 显示成矿成岩作用近于同时或成矿略滞后于成岩,发生于晚侏罗世。其形成背景对应于华北板块与扬子板块碰撞造山后的陆内造山和伸展过程。

(4) 综合分析认为,区内斑岩铜矿的成矿机制为华北与扬子两大板块碰撞后挤压-伸展转换期,岩石圈减薄,软流圈物质上涌,导致强烈的壳-幔相互作用,加厚的下地壳物质发生熔融形成富 Cu 元素的花岗质岩浆,当岩浆沿构造薄弱带上升到地壳浅部时,岩浆冷凝分异出的成矿流体充填和交代围岩而成矿。

参考文献/References

- 弓虎军,朱旗民,孙博亚,李 桦,郭 波. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(2): 248-264.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 李永峰,毛景文,刘敦一,王彦斌,王志良,王义天,李晓峰,张作衡,郭保健. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 122-131.
- 凌文黎,程建萍,王敬华,周汉文. 2002. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. 岩石学报, 18(1): 25-36.
- 卢欣祥,于在平,冯有利,王义天,马维峰,崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质, 21(2): 168-178.
- 牛宝贵,和政军,任纪舜,王 军,邓 平. 2006. 秦岭地区陡岭-小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(6): 826-835.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169-188.

- 彭海练, 杨永成, 王惠民, 张满社. 2004. 镇安县云镇小磨岭岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. 陕西地质, 22(11): 11-16.
- 任涛, 王瑞廷, 王向阳, 夏长玲, 郭延辉. 2009. 秦岭造山带柞水-山阳沉积盆地铜矿勘查思路与方法[J]. 地质学报, 83(11): 1730-1738.
- 芮宗瑞, 张立生, 陈振宇, 王龙生, 刘玉琳, 王义天. 2004. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨[J]. 岩石学报, 20(2): 229-238.
- 尚瑞钧, 严阵, 等. 1989. 秦巴花岗岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-224.
- 王瑞廷, 李剑斌, 任涛, 杨智慧, 毛景文, 王涛. 2008. 柞水-山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 36(6): 1291-1298.
- 王瑞廷, 袁海潮, 孟德明, 王磊, 马文平. 2014. 小秦岭地区金钼多金属矿成矿特征与找矿预测[J]. 地球科学与环境学报, 36(1): 19-31.
- 王相, 唐荣扬, 李实, 等. 1996. 秦岭造山与金属成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社. 132-178.
- 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 帅云, 李永革, 张长青. 2010. 小秦岭文峪娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质科学, 45(1): 167-180.
- 王宗起, 王涛, 闫臻, 闫全人. 2002. 秦岭晚古生代弧前增生的背驮型盆地体系[J]. 地质通报, 21(8-9): 456-464.
- 谢桂青, 任涛, 李剑斌, 王瑞廷, 夏长玲, 郭延辉, 代军治, 申志超. 2012. 陕西柞水盆地池沟铜钼矿床含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 岩石学报, 28(1): 15-26.
- 徐兆文, 邱检生, 任启江, 杨荣勇. 1995. 河南荣川南部地区与 Mo-W 矿床有关的燕山期花岗岩特征[J]. 岩石学报, 11(4): 397-408.
- 徐兆文, 杨荣勇, 陆现彩, 任启江. 1998. 金堆城斑岩铜矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质找矿论丛, 13(4): 18-27.
- 许志琴, 卢一伦, 汤福庆. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化[J]. 地质学报, 60(3): 237-247.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 闫全人, 王涛, 陈勇瑞, 徐学义. 2008. 造山带沉积盆地构造原型恢复[J]. 地质通报, 27(12): 2001-2013.
- 杨钊, 董云鹏, 周鼎武, 于君, 马海勇. 2008. 南秦岭柞水地区小磨岭杂岩基性岩类的地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 27(5): 611-617.
- 杨志华. 1991. 边缘转换盆地的构造岩相与成矿[M]. 北京: 科学出版社. 1-98.
- 杨志华, 朱志军, 王北颖, 周美夫, 赵太平, 苏生瑞, 张虹波, 赵晓宁. 2002. 南秦岭山柞旬-安康地区的两次逆冲推覆和 II 型造山带基本特征[J]. 西北地质, 35(1): 1-14.
- 翟裕生. 1996. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 6(1): 13-27.
- 张本仁, 陈德兴, 李泽九. 1989. 陕西柞水-山阳成矿带区域地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 58-138.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D), 26(3): 193-200.
- 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 骆庭川, 陈岳龙. 1997. 东秦岭造山带花岗岩类长石 Pb 同位素组成及其构造学意义[J]. 地质学报, 71(2): 142-149.
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2): 150-163.
- 张银龙. 2002. 陕西省山阳县小河口地区酸性-中酸性岩体地质特征及其成矿地质条件分析[J]. 陕西地质, 20(2): 27-38.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐素寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎碎沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-220.
- 朱多录, 张旺定, 邓海军, 尹万玉. 2004. 秦岭地区礼县-山阳断裂对金矿控制的初步探讨[J]. 黄金, 25(11): 9-12.
- 朱贻民, 张国伟, 郭波, 李彝. 2008. 东秦岭金堆城大型斑岩铜矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 82(2): 204-220.
- 朱铭. 1995. 秦岭地区花岗岩的 K-Ar 等时年龄和 Ar-Ar 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 11(2): 179-192.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 50(1-3): 51-73.
- Batchlor R B and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 48: 43-55.
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources-A review[J]. Lithos, 78(1/2): 1-24.
- Collins W J, Beams S D, White A J R and Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80: 189-200.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[A]. In: Cowd M P and Reis A C, eds. Collision tectonics[C]. London: Spec. Publ. Hro1. Soc. 19: 67-81.
- Mao J W, Zhang Z C and Zhang Z H. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11-12): 1815-1818.
- Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evo-

- lution of the Qinling orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 323:183-196.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956-988.
- Pearce J A. 1996. Source and setting of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19 (4):120-125.
- Selby D and Creaser R A. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia Canada[J]. *Econ. Geol.*, 96:197-204.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium- osmium analysis[J]. *Anal. Chem.*, 67: 2136-2141.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III B, IV A, VI B iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1102.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and process[A]. In: Saunderson A D and Norry M J, eds. *Magnetism in the Ocean Basins*[C]. London: Geological Society of London Special Publication, 42: 313-345.

<http://www.kcdz.ac.cn/>